

电视背板冲压为何开裂起皱？——镀锌深冲钢退火工艺优化

Cracking and Wrinkling in Stamping of Galvanized Deep Drawing Steel for TV Backboards: A Study on Annealing Process Optimization

供稿|王超, 付东贺, 王亚东 / WANG Chao, FU Donghe, WANG Yadong

内
容
导
读

针对电视机背板用热镀锌深冲钢在冲压生产中出现的开裂与起皱缺陷,从化学成分、力学性能、显微组织及断口夹杂物等方面进行了系统分析。结果表明:开裂缺陷源于退火温度偏低,再结晶不充分,材料中残留纤维状组织,导致强度偏高、延伸率不足,成形性能下降;起皱缺陷则因退火温度偏高,引发晶粒异常粗大及混晶组织,使变形协调性变差,表面呈橘皮状。据此,将退火温度优化至 $(820\pm 10)^{\circ}\text{C}$ 并严格控制温度稳定性,材料组织恢复为均匀的铁素体晶粒(晶粒度9.5级),力学性能满足标准要求。经用户批量冲压验证,缺陷完全消除。

近年来,随着家电行业的快速发展和人们对高品质家电的需求逐渐增加,传统的家电产品已无法满足消费者的需求。越来越多的消费者开始追求时尚、美观、个性化的家电产品,因此家电行业正朝着绿色化、智能化、个性化升级发展。其中,电视机背板对耐蚀性的要求越来越高,其冲压成形工艺也变得越来越复杂。热镀锌板以其良好的表面质量、焊接性、涂漆性及优越的耐蚀性在家电行业的应用占比不断增加,广泛应用于空调、电视、洗衣机等家电产品^[1-3]。热镀锌深冲用钢因其良好的成形

性能,主要用于制造冲压变形量较大的零件^[4]。佛山某家电企业采购了某钢厂的热镀锌深冲钢用于生产电视机背板,然而在生产过程中出现了冲压开裂和起皱缺陷,具体表现为电视机背板的凸包、棱角、凸沿等部位出现开裂和起皱现象。本文针对这一现象进行分析,并提出相应的解决措施。

实验材料和方法

实验材料为某家电企业冲压生产电视机背板所用的热镀锌深冲钢板,厚度为0.6 mm。其生产工艺

为：首先依据不同生产需求，将材料分条成相应规格；随后，采用机械手执行冲压工序，对分条后的材料进行冲压，使材料逐步成型，获得所需的形状与尺寸。但在实际生产中，电视机背板出现较为明显的质量问题，其中开裂和起皱现象尤为突

出。针对这些问题，经大量观察与统计分析，开裂缺陷主要集中在凸包、棱角以及凸沿处，起皱缺陷主要位于凸包处，起皱表面形貌凹凸不平，近似于橘皮状，触感与正常表面不同。具体宏观形貌如图 1 所示。



图 1 电视机背板：(a) 宏观形貌；(b) 起皱位置；(c) 开裂位置

针对存在上述问题的电视机背板材料，使用直读光谱仪进行化学成分分析，以确定材料中各元素的含量是否符合标准；按照标准制备金相试样，先将试样进行打磨处理，去除表面的杂质与不平整，使表面达到一定的光洁度；接着进行抛光操作，进一步提升表面的平整度，以满足后续观察需求。完成打磨和抛光后，采用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液对试样进行浸蚀，利用 OLYMPUS BX51 光学显微镜对处理后的金相试样进行观察。依据 GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》对材料组织晶粒度进行评级；借助型号为 EVO50 的扫描电子显微镜（SEM）及能谱仪（EDS）进行观察与夹杂物分析，检测材料内部是否存在夹杂物及其分布情况。采用万能材料试验机对样板进行力学性能测试，以测定其屈服强度、抗拉强度和延伸率等关键指标，实验参照 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温实验方法》，试样取自出现开裂现象的对应钢板，并加工成原始标距为 80 mm 的非比例拉伸试样，随后利用万能实验机进行力学性能检

验；为进一步判断起皱材料表面锌层与基板的结合力是否存在异常，参照 GB/T 232—2024《金属材料 弯曲实验方法》，对材料开展 180° V 弯镀层附着实验。实验参数设定如下：试样尺寸 60 mm×60 mm，弯头直径 2 mm，弯曲角度 180°。

实验结果和分析

开裂缺陷分析

> 化学成分

超低碳深冲钢作为汽车家电板生产中常规使用的材料，其成分设计相对简单，一般采用含 Ti 的无间隙原子（IF）钢成分体系。这种体系凭借自身特性，在深冲加工方面具备良好的工艺性能，能够满足冲压变形量较大的零部件的要求。针对出现开裂问题的材料取样进行化学成分检验。该产品化学成分的标准要求范围以及问题卷的实测成分见表 1。对比分析结果表明，问题卷的化学成分属于普通超低碳无间隙原子钢成分，各项成分均在标准要求的范围内，未出现异常波动。

表 1 化学成分检验结果（质量分数）

项目	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti
企业要求	≤0.0032	≤0.03	0.09~0.20	≤0.014	≤0.012	0.020~0.055	0.055~0.085
实测	0.0020	<0.01	0.10	0.011	0.010	0.027	0.064

> 金相组织

正常情况下，超低碳深冲钢的金相显微组织呈现为由等轴多边形铁素体构成的形态，其

晶粒度通常约为 9.5 级，具体形貌可参照图 2(a)。针对开裂材料所对应的样板金相组织进行检验时发现，其组织主要由纤维状组织与铁素体共同组

成。在显微镜下可以清晰看到，晶粒沿着轧制方向呈现出一定程度的伸长，并且存在大量的纤维状组织^[5]，具体金相显微组织如图 2(b) 所示。这种异

常的金相组织形态与正常组织存在明显差异，很可能是影响材料性能并导致开裂问题出现的关键因素之一。

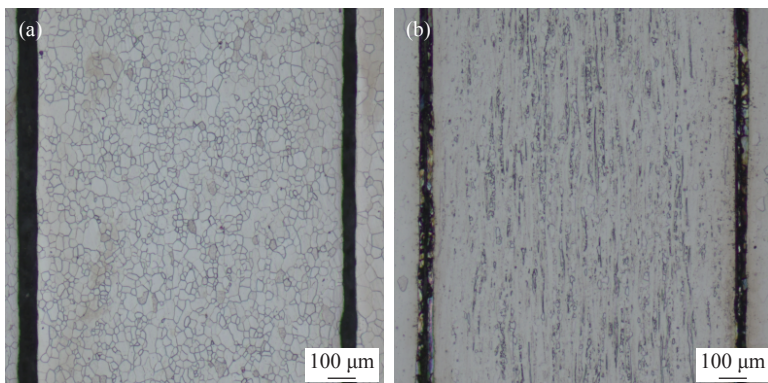


图 2 热镀锌深冲钢显微组织: (a) 正常组织; (b) 开裂材料组织

力学性能

力学性能对材料冲压成形性能的影响至关重要。拉伸实验数据表明，开裂卷的屈服强度与抗拉强度均显著偏高。此外，材料成形性能较差，其延伸率 $<20\%$ ，宽度方向真实塑性应变/厚度方向的

真实塑性应变 (r_{90}) 低于未开裂卷，具体检验结果见表 2。这些指标直观反映出材料在冲压成形过程中，抵抗变形且避免发生破坏的能力较弱，对电视机背板的冲压成形产生不良影响。

表 2 开裂卷力学性能检验结果

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	r_{90}	n_{90}
实测1	275	404	18.5	0.8	0.1
实测2	275	403	19	0.8	0.1
标准值*	140~260	270~380	≥ 30	—	—

注： n_{90} 代表垂直轧制方向 (90°) 的应变硬化指数；*参考标准GB/T 2518—2019《连续热镀锌和锌合金镀层钢板及钢带》。

断口夹杂物分析

为分析零件开裂是否由材料中的夹杂物导致，对开裂断口进行扫描电子显微镜观察及能谱仪分析。将缺陷试样经超声波酒精溶液清洗并吹干后在

扫描电子显微镜下观察断口形貌，并进行成分分析。试样断口局部区域形貌如图 3(a) 所示，开裂断口以韧窝特征为主，表明材料在断裂过程中经历了一定程度的塑性变形。为全面了解断口不同部位的

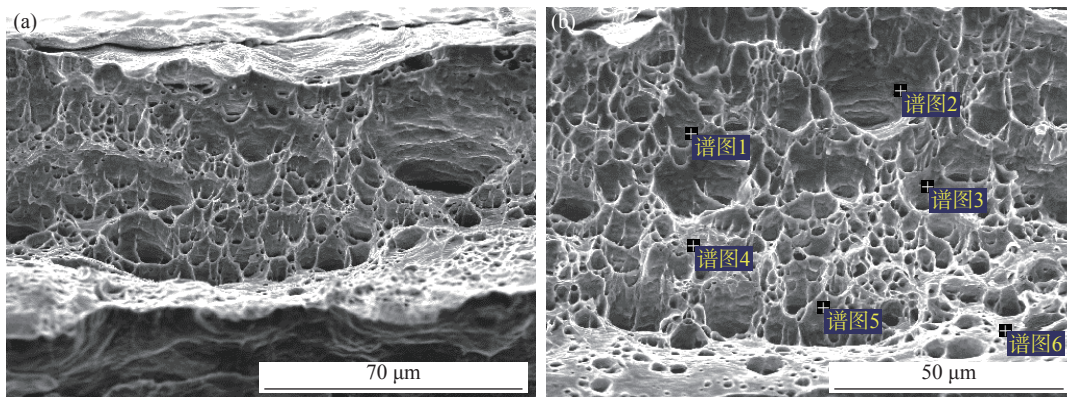


图 3 开裂材料断口形貌: (a) 断口微观形貌; (b) 能谱仪分析位置

成分变化,在断口表面选取了具有代表性的6个位置(标记为谱图1~谱图6)进行能谱仪分析,相关能谱仪分析位置如图3(b)所示。能谱仪分析结果显示其成分仅为Fe元素,未检测到其他任何杂质元素。这一结果表明,开裂材料断口处在所分析区域内无夹杂物,零件开裂并非由于夹杂物导致。

缺陷产生原因分析

通过对问题样板进行力学性能、化学成分、金相组织及夹杂物分析检验,可以判断材料化学成分正常且开裂位置无夹杂物,造成电视机背板冲压开裂的主要原因为该位置材料力学性能异常,强度偏高,延伸率偏低。造成材料力学性能异常的主要原因为冷轧连续退火温度偏低,退火不完全,未完成

回复再结晶,产生纤维状组织^[6-7]。通过对问题卷全流程生产工艺的全面排查发现,炼钢生产工艺正常、化学成分正常,热轧终轧温度及卷取温度符合工艺标准要求,但冷轧连续退火工艺在该卷带尾位置存在工艺异常波动,均热段温度偏低。

起皱缺陷分析

金相组织

对起皱材料对应钢板金相组织检验,结果表明,其组织主要由铁素体组成,但晶粒大小不均,部分晶粒异常粗大,晶粒度级别达到3.5~4级,如图4。研究表明材料表面粗糙度与晶粒大小呈正比例关系,晶粒越粗大,材料表面越粗糙,则越容易形成橘皮起皱缺陷^[8]。

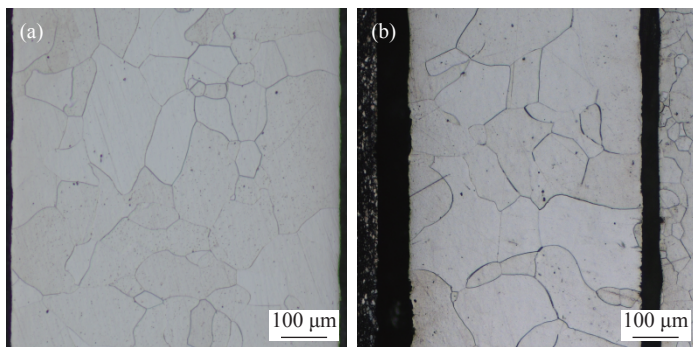


图4 缺陷样显微组织: (a) 起皱卷1; (b) 起皱卷2

力学性能

对存在起皱缺陷的对应钢板进行力学性能检验,拉伸实验数据表明(表3),材料屈服强度和抗拉强度均偏低,这与上述金相检验结果所显示的晶粒粗大现象相吻合。

表3 起皱卷力学性能检验结果

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
起皱卷1	129	245	45.5
起皱卷2	135	245	51.0

锌层附着性

为研究锌层对材料冲压后表面状态的影响,

对其进行锌重检验。结果显示,该冲压用钢每平方米的锌层重量为50~55 g,对应锌层厚度为7~9 μm,均处于GB/T 2518—2019《连续热镀锌和锌合金镀层钢板及钢带》标准规定的正常范围内。附着力实验结果表明,弯曲后材料锌层无脱落、基板无裂纹,表明锌层附着力正常,实验结果如图5所示。

缺陷产生原因分析

对全流程生产工艺的排查结果显示:炼钢环节的生产工艺及化学成分均正常,热轧终轧温度与卷取温度亦满足工艺标准要求;核心异常集中于冷轧

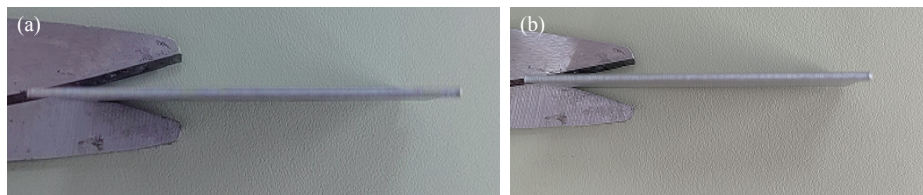


图5 镀层附着性实验结果: (a) 起皱卷1; (b) 起皱卷2

退火工序，其加热温度偏高，已超过 850℃（如表 4 所示）。其中，起皱卷 1 在连续退火（连退）过程中存在带钢降速现象。结合前文组织与性能检验结果分析可知：带钢降速会延长加热或保温时间，进而诱发晶粒异常长大；且数据显示，起皱卷 1 的屈

服强度为 129 MPa，低于起皱卷 2 的屈服强度。一方面，偏高的加热温度已达到该材料的晶粒粗化临界温度，为晶粒异常长大提供了热力学条件；另一方面，连退工序的带钢降速延长了加热时间，进一步加剧了晶粒异常粗化的程度^[9-10]。

表 4 起皱卷退火工艺

项目	加热温度/℃	保温温度/℃	平均速度/(m/s)	最小速度/(m/s)	最大速度/(m/s)
企业要求	820±10	820±10	—	—	—
起皱卷1	855	827	1.75	0.50	2.20
起皱卷2	854	826	2.03	2.02	2.22

综上，通过对问题样板进行力学性能、金相组织、镀层附着性分析检验，可以判断导致电视机背板冲压起皱主要原因为该位置材料金相组织异常，包括晶粒异常长大和混晶现象。通常，材料变形过程中，晶粒内部越靠近中心位置的区域变形量越大，而晶界及晶界附近区域的变形量较小。晶粒尺寸较细小的晶粒内部和晶界附近的应变量相差较小，因而有利于变形的均匀过渡，从而保持材料表面的平滑；反之，粗大晶粒的内部和晶界附近的应变量相差较大，晶粒之间的变形不易彼此协调，变形均匀性变差^[11-12]。因此，晶粒力学行为的各向异性在宏观上造成了凹凸不平的表面结构，从而形成起皱缺陷^[13]。

改进措施及效果

根据材料的特性和工艺要求，在保证炼钢工艺及热轧工艺关键控制点稳定的前提下，将热镀锌退火温度目标值设定在 820℃ 左右。这一温度能够为材料的回复再结晶提供足够的能量，促使材料内部的晶体结构充分调整，消除纤维状组织，改善材料的力学性能；同时，将退火炉均热段温度严格控制在 (820±10)℃，避免进入晶粒粗化温度；此外，采用 W 型辐射管加热，定期检查各温区加热元件，及时更换老化或损坏的元件，确保退火温度在设定值附近保持稳定，避免温度波动对材料性能产生不利影响。

经工艺优化后，保持退火温度稳定，材料金相组织得到明显改善，组织以铁素体为主，晶粒度 9.5 级，组织均匀，无纤维状组织，如图 6 所示。对产品进行力学性能检验，结果表明材料强度满足标

准要求，成形性能良好。经用户使用验证，材料经冲压生产后，冲压状态稳定，冲压件无开裂和起皱等异常缺陷，满足电视机背板加工冲压使用需求。

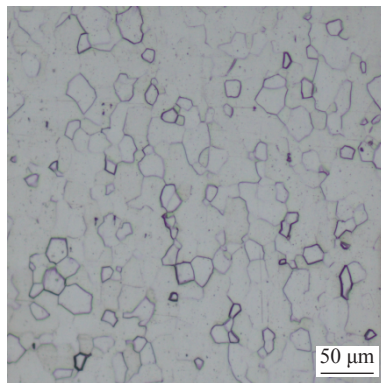


图 6 工艺优化后产品显微组织

结束语

(1) 通过化学成分、力学性能、显微组织、扫描电子显微镜及能谱仪分析可知，电视机背板用热镀锌深冲钢出现冲压开裂现象，是由于材料退火温度偏低，退火不充分，进而导致材料成形性能降低。

(2) 经力学性能、显微组织及镀层附着性检验分析可知，电视机背板用热镀锌深冲钢生产过程中，退火温度偏高，使得晶粒组织异常粗大、出现混晶，从而引发冲压起皱缺陷。

(3) 通过对退火温度进行优化，提高退火温度的稳定性，有效解决了材料组织性能异常的问题，成功杜绝了电视机背板用热镀锌深冲钢的冲压开裂及冲压起皱现象。

参考文献

- [1] 侯珍珠, 于文爽, 王闯, 等. 镀锌钢卷头尾划伤缺陷成因分析控制实践. 金属世界, 2026(1): 56
- [2] 宋青松, 马孟宁, 马幸江, 等. 热镀锌带钢锌渣缺陷产生机理及控制措施. 金属世界, 2023(5): 53
- [3] 王新东, 李建新, 吝章国, 等. 镀锌 DX52D 产品冲压起皱机理研究及解决办法. 轧钢, 2018, 35(2): 39
- [4] 魏晓东, 路璐, 宋文钟, 等. 镀锌超深冲电视机背板用钢研制. 包钢科技, 2022, 48(2): 49
- [5] 彭冲, 黄珍, 杨源华, 等. 退火温度对汽车用冷轧无间隙原子钢组织性能的影响. 江西冶金, 2022, 42(5): 43
- [6] 陈爱华, 霍昌军, 岳重祥, 等. 连续退火温度对高强 IF 钢组织及力学性能的影响. 锻压技术, 2018, 43(7): 192
- [7] 张佳奇, 宋新莉, 贾涓, 等. 退火工艺对电池壳用 IF 钢的组织、织构及力学性能的影响. 材料热处理学报, 2023, 44(12): 70
- [8] 胡振平, 彭冲, 卢江英, 等. X210P1 钢橘皮原因分析及控制措施. 江西冶金, 2018, 38(3): 15
- [9] 郝彦英, 孙万利, 张朝磊, 等. 钢材混晶组织缺陷的形成机理及控制策略. 锻压技术, 2023, 48(7): 1
- [10] 徐国军, 胡华东, 田祥省, 等. DX56D+Z 镀锌超深冲钢常见表面缺陷分析. 热加工工艺, 2023, 52(1): 157
- [11] 黄洁. DX53D+Z 镀锌板橘皮缺陷原因分析. 锻压技术, 2022, 47(7): 127
- [12] 王刚, 汪小锋, 刘先斌, 等. 晶粒尺寸和应变量对高纯铝表面橘皮效应的影响规律. 材料科学与工艺, 2022, 30(2): 51
- [13] 梁文, 刘培灿, 何龙义, 等. 深冲用 SPHC 钢开裂原因分析及改进措施. 轧钢, 2020, 37(2): 41

作者简介: 王超 (1993—), 男, 辽宁葫芦岛人, 工程师。2019 年毕业于辽宁科技大学材料科学与工程专业, 主要研究方向: 热镀锌产品研发与工艺技术。曾获 2022 年度辽宁省科技进步三等奖。通信地址: 辽宁省本溪市平山区振工路; E-mail: 845718636@qq.com。